



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

FACULTAD DE CIENCIAS

APLICACIONES DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN COMPLEJO

ALEJANDRA VIZOSO GUTIÉRREZ

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA ATÓMICA, MOLECULAR Y NUCLEAR
GRADO EN ÓPTICA Y OPTOMETRÍA



Universidad de Valladolid

TRABAJO FIN DE GRADO

APLICACIONES DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN COMPLEJO
(REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA)

Alumna:

Alejandra Vizoso Gutiérrez

Tutor:

Irene Sánchez Pavón

Juan Pablo Fernández

Valladolid, 10 de Noviembre de 2020

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

Este trabajo de fin de grado ha sido realizado durante un programa de movilidad SICUE bajo la supervisión de la Universidad de Sevilla, con el tutor Juan Pablo Fernandez.

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	6
2. OBJETIVOS DE LA REVISIÓN	7
3. METODOLOGÍA	7
4. INTRODUCCIÓN	8
Concepto de Luz.....	8
Ondas electromagnéticas.....	9
Óptica geométrica	10
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN: Diferentes aplicaciones del índice de refracción complejo.....	17
a. Estudio de las características de una celda solar fotovoltaica para el uso eficiente de la energía solar	17
b. Estudio del índice de refracción complejo de la película lagrimal para diagnosticar y tratar alteraciones de la superficie ocular	20
c. Lentes metálicas basadas en el fenómeno de transmisión extraordinaria para conseguir índices de refracción negativos.	23
d. Método para determinar las constantes ópticas de películas delgadas que presentan bandas de absorción.	24
6. CONCLUSIONES	27
7. BIBLIOGRAFÍA.....	28

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

1. RESUMEN

En lo que se refiere al índice de refracción complejo, sabemos que puede tener diversas aplicaciones según el ámbito en el que nos movamos, temas que abarcan desde la nutrición hasta celdas solares fotovoltaicas.

Este concepto es bastante importante en cualquier material, ya que será esto lo que determine su poder refractivo, y para cualquier sistema óptico esta es la propiedad más importante, siendo también de gran utilidad en química para saber la pureza de los reactivos químicos. Durante la historia se han utilizado otras referencias para caracterizar a los materiales como puede ser la velocidad de la luz en el aire, pero a lo largo del tiempo ha quedado demostrado que este concepto profundiza y diferencia mejor unos materiales de otros.

Así, para entender el contenido de este trabajo, es fundamental la comprensión de este término, como de los distintos procesos que intervienen en él: la absorción, reflexión y refracción de la luz, las ecuaciones de Maxwell, entre otros conceptos que se pretenden desarrollar a lo largo de este trabajo.

También se analizarán varios artículos de diferentes autores en aras de recabar información sobre los procedimientos que se llevan a cabo para utilizar el índice de refracción complejo en su máxima funcionalidad.

ABSTRACT

Regarding the complex refractive index, we know that it can have many different applications depending on the field in which we move, topics ranging from nutrition to photovoltaic solar cells.

This concept is quite significant in any material, since it will be this that determines its refractive power, and for any optical system this is the most important property, being also very useful in chemistry to know the purity of chemical reagents. Throughout history, other references have been used to characterize materials such as the speed of light in air, but over time it has been shown that this concept deepens and differentiates some materials from others.

Thus, to understand the content of this work, it is essential to understand this term, as well as the different processes that intervene in it: the absorption, reflection and refraction of light, Maxwell's equations, among other concepts that are intended to be developed throughout this work.

Several articles by different authors will also be analyzed in order to gather information on the procedures that are carried out to use the complex refractive index in its maximum functionality.

2. OBJETIVOS DE LA REVISIÓN

Comprender el índice de refracción complejo en su totalidad, necesario para poder entender sus diferentes aplicaciones. Principalmente desde el punto de vista de la óptica.

Conocer las diferentes opciones a las que se puede someter dicho índice para un máximo aprovechamiento de recursos o poder justificar y tratar ciertas patologías.

Analizar el éxito de los procedimientos utilizados, así como características que pueden influir en el resultado de los experimentos realizados.

3. METODOLOGÍA

En este estudio se ha realizado una revisión bibliográfica con el objetivo de recopilar la mayor información posible sobre el tema del trabajo, aplicaciones del índice de refracción complejo. Por lo tanto, la búsqueda se centró en algunas de las aplicaciones relevantes de este tema.

Se ha realizado una búsqueda bibliográfica y posterior análisis de artículos y libros con las palabras clave: *luz, onda, onda electromagnética, luz visible, óptica, óptica geométrica, luz, rayo luminoso, refracción, reflexión, ecuación de Snell, índice de refracción, índice de refracción complejo, ecuaciones de Maxwell, celda solar fotovoltaica, película lagrimal y ojo seco*. Para ello se han utilizado bases de datos online: Google Académico <https://scholar.google.es/>, así como libros académicos cuyo tema principal es la física.

Los criterios para la elección final de los artículos han sido:

- Contenido relacionado con las aplicaciones del índice de refracción complejo.
- Estar disponible, tanto el resumen como el texto completo, libre y sin costes.
- Antigüedad no superior a 15 años de los artículos (2005-2020).
- La selección del contenido se ha llevado a cabo considerando la necesidad de contar con fuentes de información de varias características:
 - Artículos que proporcionan información veraz y relacionada con el tema.
 - Los que investigan distintos factores en los que se usa un mismo concepto (*índice de refracción complejo*).
 - Estudios retrospectivos en el caso del índice de refracción complejo.

4. INTRODUCCIÓN

En este capítulo vamos a empezar a adentrarnos realmente en el tema objeto de este trabajo, definiendo así conceptos básicos para poder comprender temas que se irán abordando a lo largo del mismo. Para empezar, es imprescindible entender el concepto de *luminoso* en todos sus sentidos y aplicaciones.

Concepto de Luz

La **luz** es una onda que propaga energía sin propagar masa. Sabemos que se trata de un concepto básico para el desarrollo del mundo que nos rodea. Empezando por ser la energía necesaria para que las plantas, por ejemplo, puedan realizar la fotosíntesis y a su vez, nosotros podamos respirar o incluso absorber vitaminas. Este tipo de información es vital tanto para los animales como para el propio ser humano, ya que para nuestra visión, se entiende la luz como un concepto básico e imprescindible ^[2].

Dentro de la visión en sí, cada especie es capaz de discriminar unas imágenes u otras según los sistemas que hayan ido desarrollando en función de sus necesidades. Es decir, el sistema visual de cada especie discrimina las propiedades físicas particulares de la luz a la que es sensible su ojo.

La luz puede asemejarse al sonido por algunas de sus características, pero al no tener una base material, hace que su principal diferencia sea el no tener una ley mecánica que la explique. Pero igualmente podemos definirla como un sistema de ondas electromagnéticas, en el cual lo que se transporta, en vez de materia, es energía.

La idea que hoy en día tenemos de lo que es este fenómeno, surge con Newton en el siglo XVII y su teoría ondulatoria de la luz. Él explicaba que existía una especie de medio transparente que rellenaba el espacio que hoy conocemos como aire, dándole el nombre de *Éter*. Esta sustancia no ejercía ninguna fuerza ni efecto sobre la materia ordinaria, dando así una explicación mecánica a las ondas luminosas. Esta teoría explicaba que la luz está compuesta por unas sustancias sin masa a las que llamaba "*corpúsculos*", los cuales iban viajando a velocidad constante por el espacio y cada uno poseía un color característico que finalmente nuestro ojo era capaz de percibir.

Actualmente, como se ha mencionado arriba, se llega a la conclusión de que la luz es un conjunto de ondas las cuales nuestro ojo es capaz de percibir siempre que se encuentren dentro de un espectro visible para nuestro sistema óptico.

Ondas electromagnéticas

La teoría ondulatoria actual del electromagnetismo fue estudiada por Thomas Young y Agustín Fresnel. En sus experimentos, parten de los avances en la electricidad y el magnetismo del siglo XIX para descubrir la existencia de una superposición de ondas, y sacar una conclusión matemática en la que existe una velocidad constante para la propagación de esas ondas definida por unas constantes eléctricas. Así, llegan a la conclusión de que la luz es una forma de radiación electromagnética.

Las **ondas electromagnéticas** son el resultado de la conexión que hay entre los campos eléctricos y magnéticos oscilatorios. Tanto las propiedades como la existencia de estas ondas las define Maxwell tras realizar varios estudios. Llega a la conclusión de que el resultado de estas ondas es la unión de las ondas de tipo eléctrico con las de tipo magnético, avanzando éstas en el espacio perpendicularmente entre sí, y a su vez perpendicularmente también con la dirección de propagación de la onda, lo que hace que se trate de ondas transversales. Los campos eléctrico y magnético avanzan estando siempre en fase, es decir, alcanzan su amplitud máxima y mínima en los mismos puntos, a lo largo de toda su propagación (*Figura 1*). El científico, también llega a la conclusión fundamental de que la luz avanza en el vacío siempre con la misma velocidad c constante ($c=299.792.458$ m/s en unidades del SI). En otros medios, la velocidad de estas ondas irá variando en función del medio que se trate, viniendo definido por la siguiente ecuación (*Ec.1*), donde λ es la longitud de onda y f la frecuencia de la onda (número de ondas que pasan por un punto en un tiempo determinado):

$$v = \lambda \cdot f$$

[Ecuación 1]

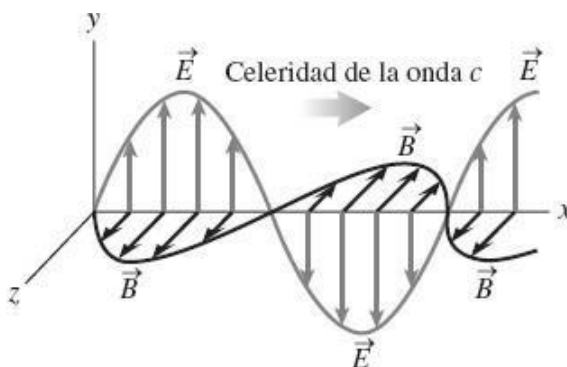


Figura 1 – Representación tridimensional de una onda electromagnética. Muestra la perpendicularidad de los campos entre sí y la dirección de la onda.

La ley de Faraday establece que la variación de un campo magnético da lugar a energía eléctrica, es decir, tiene que haber energía eléctrica dentro de un conductor para tener

una corriente eléctrica. Entonces, Maxwell llega a la conclusión de que la variación de un campo magnético crea un campo eléctrico, cuanto mayor es la variación de este campo magnético, mayor será la intensidad del campo eléctrico final. Estos campos viajan por el espacio regenerándose continuamente en forma de onda electromagnética.

Hoy en día, y gracias a estos descubrimientos, los físicos determinan (Rex A, Wolfson R)^[10] el espectro visible para el ojo humano (luz visible), oscila entre ondas cuya longitud de onda son 4×10^{-7} y 7×10^{-7} m. Todas las que se encuentren fuera de este rango, ya sea por arriba o por abajo, reciben nombres concretos a sus características, como pueden ser: desde las ondas de radio, hasta los rayos gamma con longitudes de onda inferiores a 10^{-25} m, estando entre ambas las microondas, rayos X, ultravioleta, etc. (Figura 2).

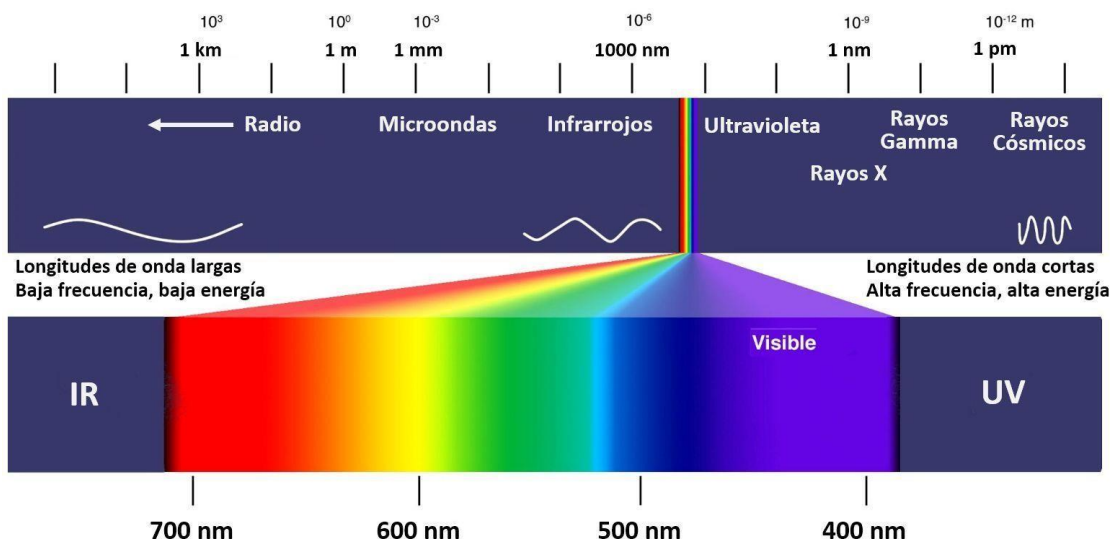


Figura 2 – Rangos del espectro electromagnético. Fuente: (<https://www.experimentoscientificos.es/espectro-electromagnetico/espectro-luz-visible/>).

Óptica geométrica

El campo de la Óptica abarca un estudio muy extenso. Se entiende **Óptica** como el “estudio de las radiaciones electromagnéticas de todas las frecuencias, es decir, la producción, la emisión, propagación, absorción y detección”^[5]. Cuando la luz deja de desplazarse sola en el espacio y comienza a interactuar con materia, es decir, su longitud de onda es comparable con el tamaño de algún objeto, ya no se puede ignorar la característica ondulatoria que posee, ya entran en juego la *interferencia* y la *difracción* de la luz.

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

En nuestro caso, nos importa más el sector de la **Óptica Geométrica**, que es la que se centra en las ondas propiamente dichas y la propagación de la luz concretamente (en líneas rectas denominadas *rayos*) a través de determinados medios, siempre que estos sean homogéneos e isotropos (la velocidad es la misma en todos los puntos del medio material, debido a que el índice de refracción es constante).

Para hacer estas predicciones de la trayectoria se tiene en cuenta el *rayo luminoso* para caracterizar a la luz y el *índice de refracción* para caracterizar al material. A partir de esto, con el Principio de Fermat, surge la teoría geométrica necesaria para desarrollar un trazado de rayos correspondiente al medio, empleando: lentes, espejos, prismas u otras sustancias en las que hay un cambio de medio que produce la alteración de la trayectoria de esos rayos. Con este modelo geométrico se consigue predecir la orientación de los rayos y la trayectoria de su energía a través de diferentes medios materiales. Teniendo en cuenta que para la trayectoria del rayo siempre seguiremos el menor recorrido, es decir, una línea recta. Cuando la fuente está muy lejana (infinito) respecto al medio que se va a interpretar, los rayos provenientes serán paralelos entre sí.

Sabemos que a partir de ciertas superficies, sin éstas poseer ninguna fuente de iluminación, se pueden obtener imágenes. Este fenómeno se nos presenta continuamente en nuestra vida cotidiana, ya que sin ello directamente no podríamos ver. Al no reflejarse la luz sobre los objetos no llegaría el rayo luminoso hasta nuestros ojos y por lo tanto no lo percibiríamos.

Esto se debe al fenómeno de la **Reflexión** (*figura 3*), el cual a partir de fuentes que sí generan luz y superficies lisas o pulimentadas, se da lugar una imagen. Habitualmente, como la mayoría de las superficies no son totalmente lisas, sino microscópicamente rugosas, la luz reflejada será *difusa*. No como en el caso de las superficies pulimentadas, como son los espejos, en los que la reflexión será del tipo *especular*.

Cuando un rayo luminoso (procedente de una fuente) incide sobre una superficie con diferente medio del que procede puede suceder lo siguiente: 1) parte de la luz atraviesa el segundo medio y cambia su dirección, refracción, y 2) el segundo medio rechaza el rayo y éste vuelve al primer medio, es decir, la reflexión.

En el caso de la reflexión, el ángulo (α) con el que incide el rayo sobre una superficie lo tomamos respecto a la normal del plano de incidencia. Este ángulo de incidencia y el resultante (α') con el que sale despedido o reflejado el rayo, serán del mismo valor.

$$\alpha = \alpha' \quad (\text{Ley de la reflexión})$$

[Ecuación 2]

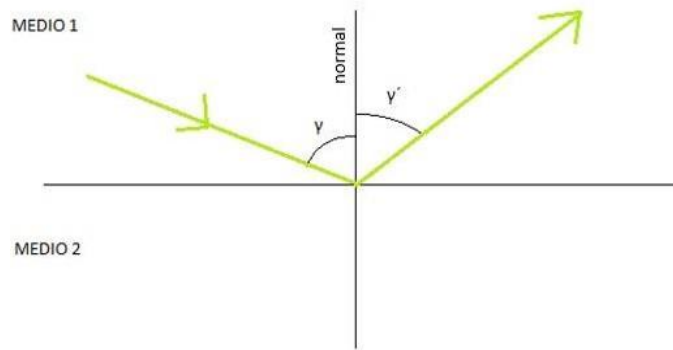


Figura 3 – Fenómeno de la reflexión. Representación gráfica cuando incide un rayo sobre una superficie y el rayo luminoso sale despedido en otra dirección.

La *intensidad de la onda reflejada* o *coeficiente de reflexión* (Ecuación 3) será el resultado de dividir la intensidad de la onda que se refleja (I_r) y la fracción de onda incidente (I_i). La intensidad de la onda que incide podrá comprender unos valores entre 0 y 1 siendo la unidad el valor de reflexión máximo, es decir, no existe luz refractada y la luz es reflejada en su totalidad; pero así mismo, ese valor nunca podrá ser 0 exactamente ya que siempre, en cualquier medio, existe un mínimo de luz reflejada.

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

La luz que es atravesada por el segundo medio se conoce como el fenómeno de la **Refracción** (figura 4). Para Wilson Jerry^[14] la refracción es el cambio de dirección de una onda en la interfase donde pasa de un medio transparente a otro. Una parte de la onda siempre se refleja y otra se transmite. La luz con la que incide el rayo no es la misma con la que se transmite, es entonces cuando se dice que la luz se ha refractado, es decir, ha cambiado de dirección.

Los cambios de dirección de un medio a otro son debidos a la diferente velocidad con la que viaja la luz en un medio u otro. Esto dependerá de la cantidad de átomos por volumen que compongan dichos materiales. Pero como es lógico, en un medio en el que haya mayor número de átomos la luz tendrá menor velocidad que en otro en el que el número de éstos sea menor, por lo tanto la luz tendrá menos velocidad cuanto mayor sea la densidad del medio. La velocidad de la luz siempre será máxima en el vacío.

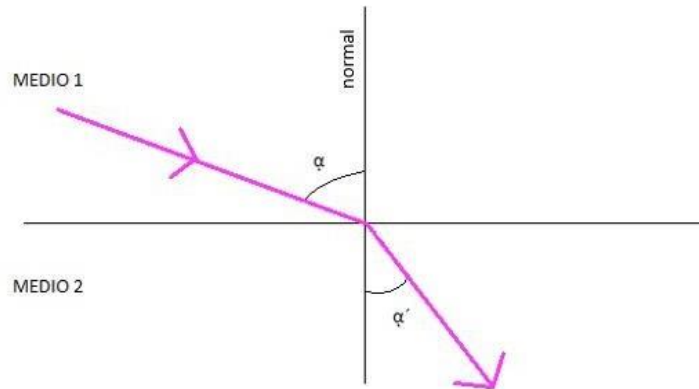


Figura 4 – Fenómeno de la refracción. Representación gráfica cuando incide un rayo sobre una superficie y el rayo luminoso es absorbido por el segundo medio.

El rayo siempre incide con un ángulo α y será refractado con un ángulo diferente α' , siempre tomando como referencia la normal respecto al plano de incidencia, como podemos ver en la (Figura 4). Esta variación entre el ángulo de incidencia y el resultante es lo que determinará la dirección de propagación de la onda.

El ángulo α' resultante al cambio del medio, siempre tomará una dirección u otra dependiendo de la diferencia entre los índices de refracción de los medios, donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios 1 y 2 respectivamente. El rayo es refractado hacia la normal cuando el segundo medio tiene un índice de refracción más alto que el primero. Por el contrario, se alejará más de la normal cuando el medio 1 tenga un índice de refracción más bajo. Esto viene definido por la ecuación de Snell (Ecuación 4).

$$\boxed{\text{sen } \alpha \cdot n_1 = \text{sen } \alpha' \cdot n_2}$$

[Ecuación 4]

Esta ecuación recibe el nombre del físico Willebrond Snell (1580-1626) ya que estudió la relación que existe entre los ángulos (α) y la velocidad de los rayos luminosos en los medios donde interactúan.



Figura 5 – Representación de cómo varía la imagen que obtenemos al ver ciertos objetos en un medio 1 (aire) y en un medio 2 (agua). Fuente: (Velual [CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)])

También hay que tener en cuenta que la trayectoria de un rayo siempre es reversible, es decir, cuando un rayo proveniente de un medio A incide sobre un medio B y es reflejado y/o refractado, en el caso de que quisiéramos invertir las direcciones, siguiendo un camino de B hacia A, éste sería exactamente el mismo recorrido que hizo previamente pero en sentido inverso.

Si tenemos en cuenta la ecuación de Snell, nos surge la idea de qué ocurriría si el ángulo con el que incide el rayo α produce en la ecuación un valor de $\sin \alpha'$ mayor de la unidad, este valor del seno sería erróneo, ya que recordamos que el valor máximo para el seno sería 1. En este caso, al sustituir los valores en la ecuación de Snell y obtener un seno mayor de la unidad, lo que ocurre se llama reflexión total, es decir, no existiría ningún componente del rayo luminoso refractado. Conclusión, esto ocurrirá en casos en los que el rayo provenga de medios con un índice de refracción más alto que el segundo medio, y será reflejado con un ángulo final (α') respecto a la normal llamado *ángulo crítico* (Figura 5).

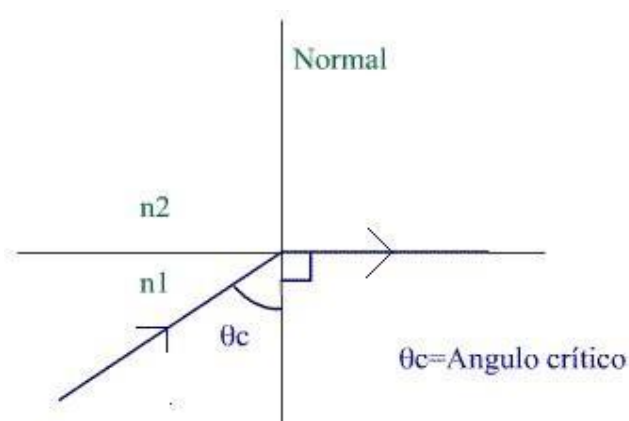


Figura 5 – Reflexión total al incidir rayo luminoso sobre un medio.

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

Pero, a parte de la reflexión o la refracción, existe una tercera opción que puede tomar la luz al incidir en otro medio, la denominamos **Absorción**. Ocurre en cuerpos opacos.

Generalmente, siempre en mayor o menor medida suele existir parte de estos tres componentes cuando incide la luz sobre una superficie. Esta proporción variará en función de las características intrínsecas de las superficies.

El **Índice de refracción** es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío (en forma de onda electromagnética) c ($c=2.99792458 \cdot 10^8$ m/s) y la velocidad de la luz en otro medio diferente v .

$$n = \frac{c}{v}$$

[Ecuacion 5]

En cualquier medio que no sea el vacío, siempre tendrá un valor superior a la unidad, ya que la luz se propaga más lentamente en cualquier otro medio material.

Al ser el cociente de dos velocidades, tomadas con las mismas unidades en el Sistema Internacional, el resultado de dicha ecuación siempre será adimensional.

Hay que tener en cuenta que el resultado de esta ecuación puede variar algo en función de la longitud de onda con la que hemos tomado como referencia al medir la velocidad de la luz en el medio (excepto en el vacío). Esto vendrá definido por la siguiente ecuación (Ecuación 6):

$$v = \lambda \cdot f$$

[Ecuacion 6]

Si hablamos de una onda, la **frecuencia** f es el número de crestas que pasan por un punto determinado en cada unidad de tiempo. Como en estos casos las ondas no varían, es decir, se mantienen estables a lo largo del tiempo sin desaparecer o reaparecer; la frecuencia no será un factor del que dependa el valor de la velocidad v . Por el contrario, la longitud de onda λ , sí que es un valor que puede variar en diferentes situaciones, es por eso que tenemos que tenerlo en cuenta a la hora de tomar las medidas y calcular la velocidad de la luz en cierto medio.

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

Sustancia	Índice de refracción n	Sustancia	Índice de refracción n	Sustancia	Índice de refracción n
Sólidos		Vidrios		Líquidos	
Hielo	1.31	Clásico/Crown	1.52	Agua	1.33
Cuarzo	1.54	De plomo (ligero)	1.58	Etanol	1.36
Circonio	1.92	De plomo (denso)	1.66	Glicerina	1.47
Diamante	2.42	De lantano	1.80	Aceite	1.52

Tabla 1 - Índices de refracción de diferentes sustancias ($\lambda= 589\text{nm}$; lámpara amarilla de vapor de sodio)

El **índice de refracción complejo** es el valor resultante de sumar una parte real que es el *índice de refracción* n propiamente dicho y una parte imaginaria que es el *coeficiente de extinción* k . Este valor de k está directamente relacionado con la absorción de la luz en un medio.

En la (Tabla 1), se muestran algunos ejemplos que ya conocemos de índices de refracción comunes de diferentes sólidos, vidrios o líquidos.

Maxwell a partir de las teorías de Faraday, Lenz o Ampère las unifica y deduce sus propias ecuaciones, abajo mencionadas. Representan cómo se comporta un campo eléctrico y uno magnético interviniendo los parámetros característicos de los diferentes medios en los que están los campos.

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \text{ (Ley de Faraday)}$$

$$\nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \text{ (Ley de Ampere)}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \text{ (Ley de Gauss eléctrica)}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \text{ (Ley de Gauss magnética)}$$

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

A partir de estas cuatro ecuaciones, mencionadas anteriormente, se puede ir obteniendo sucesivamente una expresión concreta que define el índice de refracción complejo (*Ecuación 7*).

$$N = n + ik \quad \text{[Ecuacion 7]}$$

Donde N es el índice de refracción complejo, n el índice de refracción y k el índice de extinción.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN: Diferentes aplicaciones del índice de refracción complejo.

En este capítulo se va a profundizar en el tema principal objeto del trabajo, es decir, las diferentes aplicaciones del Índice de refracción complejo recopiladas tras una extensa búsqueda de información. Tanto en el campo de la física como en el de la óptica se trata de un concepto que está muy presente en diferentes estudios.

- a. Estudio de las características de una celda solar fotovoltaica para el uso eficiente de la energía solar.

A causa del calentamiento global, la contaminación y el desabastecimiento de recursos naturales que hoy en día quedan en la Tierra, el ser humano ha ido desarrollando nuevos sistemas tecnológicos que respetan el medio ambiente y a la vez nos aportan otra forma de obtener energía, denominado *Tecnologías de energía verde*.

Uno de esos sistemas son las *Celdas Fotovoltaicas (Figura 7)*. Estas celdas solares tienen como finalidad transformar la energía que obtienen del sol en energía eléctrica capaz de abastecer la red eléctrica de cualquier inmueble, dando como resultado una corriente y un voltaje.



Figura 7 – Celda solar fotovoltaica. Fuente:(www.iberdrola.com).

Esta tecnología está en continua investigación con el interés de ir desarrollando mejores sistemas que cada vez nos aporten más eficiencia. La primera celda solar fue creada por Charles Fritts en 1984 y su eficiencia era de apenas un 1% ^[7], lo que en la actualidad se queda bastante desfasado ya que ahora las nuevas tecnologías nos ofrecen hasta un 23% de eficiencia (celdas mono-unión). Estos estudios de eficiencia se basan en las características ópticas que ofrecen los diferentes materiales y las ecuaciones básicas que explican el comportamiento de la celda. Los nuevos estudios se basan en las celdas multi-unión, las cuales generan un desplazamiento de frecuencia de la energía y sistemas de concentración fotovoltaica.

Lo que se trata es de seleccionar los materiales capaces de absorber mayor parte de la luz incidente, o sabiendo estos datos optimizar las características del material para aprovechar al máximo esa cantidad de luz; para ello lo relacionamos con el parámetro óptico conocido como *absorción*, es decir, la parte imaginaria del índice de refracción complejo.

La luz que es capaz de absorber la cuantificamos fraccionando la luz entrante a cierta energía fotónica, e , que absorbe el material y produce un estado de excitación como un par electrón-hueco. Estos valores se miden y calculan por una función de la energía fotónica que conduce a $A(e)$, o por una función definida por la longitud de onda fotónica que conduce a $A(\lambda)$.

Hay que tener en cuenta que no toda la absorción del material creará actividad electrón-hueco. Esta absorción se puede calcular con las constantes ópticas que ya conocemos propias de cada material o medirla directamente. Para calcular cuántos pares electrón-hueco es capaz de generar el material debemos multiplicar la absorción por el flujo de fotones entrante. Pero lo que realmente interesa de esta tecnología es saber cuánta corriente es capaz de servir cada panel, y esto lo obtenemos a partir de los pares electrón-hueco y la carga elemental q . Al multiplicar entre sí estos dos valores e integrándolo sobre el espectro solar conseguimos este valor que realmente nos interesa en términos energéticos.

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

Pero hablando en términos ópticos, el fenómeno que justifica las propiedades de un material será el índice de refracción complejo n_c . Este valor está formado como su propio nombre indica por un factor imaginario y por otro real. El factor imaginario es el coeficiente de extinción k (término relacionado con la absorción de la luz en un material) y la parte real será el índice de refracción n . Por lo tanto, el índice de refracción imaginario tendrá como resultado la suma de estos dos valores mencionados (Ecuación 8):

$$n_c = n - ik \quad \text{[Ecuación 8]}$$

El coeficiente de extinción k se relaciona con la absorción en la siguiente ecuación (Ecuación 9):

$$A(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \quad \text{[Ecuación 9]}$$

El coeficiente de absorción nos aporta la información de cantidad de intensidad de luz que disminuye al propagarse la luz en un material como son las celdas fotovoltaicas. Estos valores son importantes en el cálculo de eficiencia ya que vamos obteniendo otros sucesivamente, como son el número de fotones por unidad de área (Ec. 10), la posición que adopta la absorción en el material x , la cantidad de fotones no absorbidos (Ec. 11). Los fotones que inicialmente entraron al material, el grosor del material t o la transmisión (Ec. 12).

$$\frac{d\Gamma}{\Gamma} = -A dx \quad \text{[Ecuación 10]}$$

$$\Gamma = \Gamma_0 \exp(-At) \quad \text{[Ecuación 11]}$$

$$\Gamma / \Gamma_0 \quad \text{[Ecuación 12]}$$

Ópticamente otro concepto importante es la energía mínima que se necesita para que un electrón sea excitado y así ser conducido hacia la carga; lo denominamos *región prohibida óptica* E_g y se puede obtener su valor a partir del coeficiente de absorción con la siguiente relación:

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

$$A(e) = C_d \sqrt{e - Eg}$$

[Ecuación 13]

C_d es aproximadamente $2 \cdot 10^4$ (si A viene dada en unidades del SI cm^{-1})

En los estudios sobre este tema finalmente se llega a la conclusión de que entre el modelo teórico y los efectos de una carga variable en la realidad hay una variación en los resultados de hasta un 20% [7]. También es importante tener en cuenta la reflexión de la luz y la irradiación solar para obtener los valores finales de eficiencia de las placas solares. Por lo tanto el índice de refracción como hemos ido viendo en el desarrollo de las ecuaciones, es un dato imprescindible para poder optimizar esa aportación energética.

- b. Estudio del índice de refracción complejo de la película lagrimal para diagnosticar y tratar alteraciones de la superficie ocular.

La película lagrimal forma un papel imprescindible en la visión del ser humano, tanto óptica como metabólicamente. Es por ello que hay bastantes estudios que se basan en su fisiología para interpretar las patologías que puede sufrir el globo ocular.

En la actualidad cabe destacar una patología muy común, el *Ojo seco*. Esta es una de las patologías que más abundan a nivel de la superficie ocular con diferentes etiologías pero con una afectación común, que es el déficit funcional de la lágrima.

A largo plazo, acaba generando patologías secundarias como pueden ser opacidades corneales y/o conjuntivales que cursan con molestias y en ocasiones, dolor; y que finalmente, pueden impedir la visión de los sujetos.

La película lagrimal está compuesta por agua, lípidos, enzimas, sales, glucosa, proteínas y otras células del epitelio. Estos componentes, por sus características osmóticas, hacen que se dividida en tres fases: *capa acuosa*, *capa mucosa* y *capa lipídica*.

Esta sustancia es un fluido biológico (*biofluido*) que sigue, al igual que otros medios, las leyes de la óptica. Pero en los estudios relacionados con el Ojo seco lo que se estudia con especial atención, son sus capacidades de refracción y esparcimiento de la luz recurriendo al concepto de *medio efectivo*, es decir, hay que tener en cuenta el modo en el que se propagan las ondas por ser este medio en concreto [1].

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

El medio efectivo nos resulta interesante en estas situaciones en las que el medio no es homogéneo, sino como en este caso es estratificado (*Figura 8*), es decir, en diferentes posiciones de la onda toma diferentes direcciones el rayo luminoso. Por lo tanto en estos casos es necesario realizar refractometría no convencional.

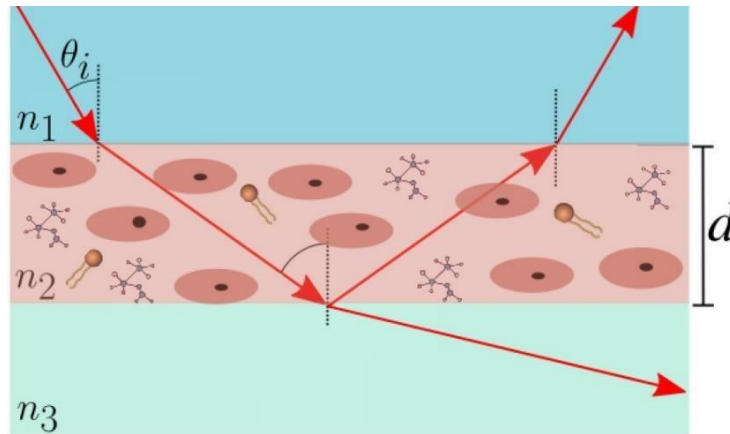


Figura 8 – Componente coherente de la luz reflejada por un sistema efectivo de tres medios siendo el medio 2 considerado como medio efectivo con índice de refracción complejo. Fuente: (Artículo Estudio del índice de refracción complejo de la película lagrimal. Su utilidad en el diagnóstico y tratamiento de alteraciones de la superficie ocular).

Dichos medios, con ecuación compleja, constan de un componente complejo (índice de refracción efectivo, medido con refractómetros) y otra parte imaginaria correspondiente a las ganancias o pérdidas por esparcimiento de la luz a lo largo de la onda luminosa cuando incide en los diferentes estratos del medio, que en este caso sería la película lagrimal.

También hay otros estudios relacionados con esta misma patología ^[8], pero en este caso centrando el problema en una de las capas antes mencionadas, la *capa lipídica*, mediante el estudio de su grosor a través de los colores interferenciales (proceso no invasivo y semicuantitativo). A diferencia del caso anterior en el que se tomaba como objeto de investigación la película lagrimal por completo, aquí se busca una explicación en una única capa.

Se trata de buscar la relación que hay entre la cantidad de capa lipídica y el ojo seco. En un ojo sano esta capa tiene un estrato de entre 40 y 100 nm. En este tipo de patología hay un déficit funcional de la lágrima, siendo el valor normal de su espesor entre 3 y 40 micras.

La *capa mucosa* es la más profunda, en contacto con la córnea adhiriéndose a su epitelio con un espesor de aproximadamente 0,5 micras. Luego le sigue la capa más

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

abundante, *capa acuosa*. Y externamente, la *capa lipídica*, secretada por las glándulas de Meibomio principalmente, cuya función es evitar la evaporación de la capa acuosa.

El estudio de los colores interferenciales se hace en pacientes reales, observando la superficie ocular con lámpara de hendidura. Esta relación fue descubierta por Newton y varios científicos le han seguido hasta que en 1997, Guillon clasifica los patrones interferenciales según el grosor de la capa lipídica.

A parte de la lámpara de hendidura pueden usarse otros sistemas para observar este fenómeno como son: microscopio interferencial biodiferencial, fotoqueratoscopia, microscopía especular, interferometría, videograbadora especular de reflexión, reflectometría o lipodacrioscopios interferenciales.

Se observa que cuando incide un rayo de luz blanca sobre la superficie ocular, atraviesa la película lagrimal y aparece un patrón de colores interferenciales que variará en función del espesor de esta película. Si tiene un espesor de entre 100 y 130 nm la luz reflejada en la primera superficie (aire-capa lipídica) interfiere con la reflejada de la superficie posterior (capa lipídica – capa acuosa). La resultante será un patrón de color rojo-marrón ya que las longitudes de onda del color azul ($\lambda=400$ nm) se eliminan al estar en fase opuesta y la luz roja ($\lambda=800$ nm) al estar en cofase se hace visible para nuestro ojo. Si el espesor de la capa lipídica aumenta (180-200nm) se anulan los rayos de longitudes de onda mayores por estar en oposición de fase y pasan a observarse patrones de colores azul-verde. Estos valores obtenidos varían si en vez de luz visible se emplea luz monocromática, y el resultado final del espesor de esta capa con este método suele ser de unos 68 nm.

A pesar de existir varias causas para esta patología, se sabe con certeza que la alteración de la capa lipídica provoca una evaporación significativa de la capa acuosa. Esto sucede en patologías como son la Blefaritis o en procesos con distintos agentes (bacterias, contaminantes, conservantes, etc.).

Por lo tanto, el concepto de *Índice de refracción complejo* también es fundamental en el ámbito de la patología ocular, ya que el ojo no deja de ser un medio óptico a través del cual siempre hay un rayo luminoso, en el cual nos centramos para estudiar cómo interfiere la variación de dicho concepto, objeto de este trabajo.

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

- c. Lentes metálicas basadas en el fenómeno de transmisión extraordinaria para conseguir índices de refracción negativos.

En los últimos años se han descubierto unas estructuras artificiales que permiten la creación de medios que presentan una gran respuesta del índice de refracción negativo como la resultante de la combinación de dos resonancias (*medios zurdos*), es decir, una resonancia en la permeabilidad eléctrica, ϵ , y otra en la permeabilidad magnética, μ .

El descubrimiento de estos materiales lo que ha conseguido es que haya un gran incremento en su investigación con el fin de poder optimizarlos, ya que se ha comprobado que anteriormente existían grandes pérdidas en los metamateriales de primera generación. Especialmente se centran en los metamateriales con índice de refracción negativos en altas frecuencias.

El Laboratorio de Ondas Milimétricas ha realizado un estudio en que minoriza las pérdidas a través del fenómeno de Transmisión Extraordinaria. A través del índice de refracción negativo se consigue que haya muy bajas pérdidas en el rango de ondas milimétricas con técnicas interferométricas y la ley de Snell, recibiendo el nombre de *Extraordinary Transission Metamaerial*, ETM.

En este caso, este tema se va a relacionar con la mejora de las lentes y el conformado de haces ya que calculando los valores de ϵ y μ se puede conseguir una plena adaptación de la lente al entorno, ya que (Ec. 14):

$$n = \sqrt{-\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \text{[Ecuación 14]}$$

Además, este tipo de lentes con índice de refracción negativo permiten mayor radio de curvatura que lentes cuyo índice de refracción es positivo, de esta manera lo que se consigue es disminuir significativamente el número de aberraciones.

Se descubre que en este tipo de lentes (*zurdas*) los rayos luminosos siguen un camino cambiado, es decir, en estos casos los perfiles cóncavos son los que hacen converger las ondas electromagnéticas y por el contrario, los perfiles convexos los harán diverger. Este dato es importante a la hora de obtener un mejor resultado, y se demuestra a lo largo de varios experimentos que es viable la fabricación de estos perfiles de lentes plano-cóncavos (concentrando la radiación de un frente de ondas plano en un foco) y bi-cóncavos (trasladando el foco) en el rango de las ondas milimetradas (*Figura 9*).

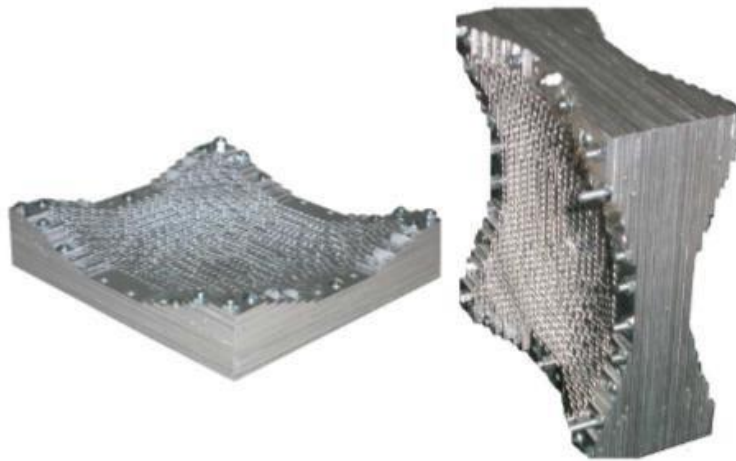


Figura 9 – Prototipo de lente ETM plano-cóncava (izquierda) y plano-convexa (derecha). Fuente: Artículo Lentes metálicas basadas en el fenómeno de transmisión extraordinaria para conseguir índices de refracción negativos.

El concepto del índice de refracción negativo $n = -1$ hasta ahora siempre había sido simplemente un concepto matemático sustituyéndola en la ecuación de Snell dando lugar a la ley de la reflexión especular. Pero con la aparición de los metamateriales se empieza a trabajar también en conceptos de transmisión, en lugar de en reflexión. El que antes era habitualmente el reflector parabólico, ahora pasa a ser una lente parabólica con índice de refracción $n = -1$.

Utilizando un Software CTS Microwave Studio™ se calcula el diagrama de apilamiento infinito para calcular la frecuencia de nuestra lente y hacer que se comporte como un medio de índice refractivo efectivo $n = -1$ a 53,5 GHz^[9]. Y también se calcula la distribución de la potencia en estos tipos de lentes para comprobar que el diseño es consistente.

- d. Método para determinar las constantes ópticas de películas delgadas que presentan bandas de absorción.

Dependiendo de los diferentes materiales sabemos que se obtienen diferentes valores de constantes ópticas como son: *índice de refracción, coeficiente de absorción, espesor de las películas delgadas o la brecha de energía prohibida*, los cuales son característicos de cada material propiamente.

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

Los espectros siempre tienen unos máximos y unos mínimos específicos que van variando a lo largo de la transmitancia de un material. Dichos espectros son fundamentales para el tema que vamos a abordar, y tomando valores experimentales podemos hacer una simulación para así poder obtener los valores ópticos arriba mencionados.

Hay que tener en cuenta, que estas bandas poseen una zona de absorción las cuales están en una parte transparente del material que pueden ocasionar desplazamientos verticales y horizontales en las posiciones de los máximos y los mínimos, dando lugar a valores equívocos del espesor e índice de refracción.

Esta aplicación del índice de refracción se realiza en torno a estudios ^[15] de una muestra de MoO₃ preparada por evaporación con láser en alto vacío empleando para ello un láser de CO₂. Se emplea un espectrofotómetro PERKIN ELMER λ2000.

El espectro de transmitancia (*Figura 10*) presenta una zona de absorción la cual se ve limitada por la brecha de energía prohibida del material, las franjas de interferencia y una diferencia entre máximos y mínimos de 770 nm asociada a una banda de absorción en la región.

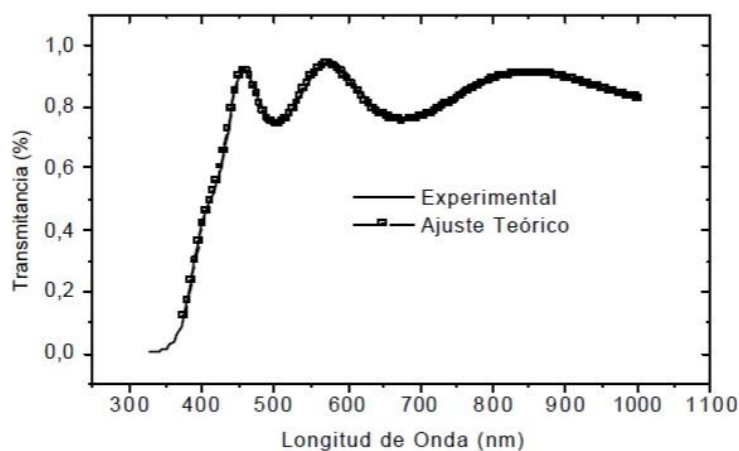


Figura 10 – Espectro de transmitancia experimental comparado con el ajuste teórico calculado. Fuente: Artículo Método para determinar las constantes ópticas de películas delgadas que presentan bandas de absorción.

Para obtener valores muy similares de máximos y mínimos entre el espectro experimental y el obtenido teóricamente se toma el material como transparente y homogéneo en toda la región del espectro. De esta forma es posible calcular el espesor de la película en la región de los máximos y mínimos con ayuda de la siguiente ecuación (*Ec. 14*):

Aplicaciones del índice de refracción complejo.

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \quad \text{[Ecuación 14]}$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de dos máximos o mínimos consecutivos ubicados en las longitudes de onda λ_1 y λ_2 respectivamente.

Se produce un desplazamiento de los máximos y los mínimos por la banda de absorción el cual puede ser compensado ya que el corrimiento del máximo siempre será opuesto al del mínimo y así se produce una compensación en el valor medio del espesor calculado en las diferentes parejas de máximos y mínimos.

Una vez obtenido el espesor de la muestra a partir de la posición y el número de máximos y mínimos en el espectro, ahora ya podemos deducir el valor del índice de refracción de todo el espectro para cualquier longitud de onda, incluso la zona de alta absorción, usando el oscilador simple de Wemple DiDomenico (W-D).

El valor del índice de refracción se deduce a partir de la siguiente ecuación (Ec. 15) tomando la energía del oscilador (E_0) y la Energía de dispersión (E_d) con sus valores numéricos correspondientes.

$$n^2 - 1 = \frac{E_d E_0}{E_0^2 - \hbar^2 \omega^2} \quad \text{[Ecuación 15]}$$

Por último, se calcula el coeficiente de absorción, con la siguiente expresión teórica de la transmitancia. Siempre tiene que haber una comparación entre el espectro experimental con el obtenido a lo largo de todos los cálculos, comprobando así que existe una relación entre ambos.

Con este estudio, se llega rápidamente a unos valores ópticos fundamentales como son el índice de refracción, el coeficiente de absorción y el espesor de una película delgada con bandas de absorción a partir de unos valores teóricos, que posteriormente se van solapando con los experimentales hasta finalmente obtener los resultados deseados.

6. CONCLUSIONES

El índice de refracción complejo tiene especial incidencia sobre varios aspectos relacionados con la física, en concreto con la óptica geométrica. Hemos analizado que sus vertientes siempre parten de las características de cada material, y a partir de ahí estos tendrán unas interacciones con el medio que los rodea dándose situaciones concretas, las cuales han sido objeto de este trabajo.

Primero hemos estudiado la importancia de optimizar los materiales empleados en la fabricación de paneles solares para obtener un máximo potencial energético. Veíamos que en la actualidad la mayor empleabilidad de *energía verde* en hogares e incluso empresas genera menores cifras de contaminación. Asimismo, la evolución de la tecnología solar puede desembocar en una nueva línea de investigación dentro del campo de la óptica, con el fin de seguir mejorando la eficiencia energética y acabar superando esas mejoras que actualmente se encuentran entorno al 20%.

El índice de refracción complejo es directamente proporcional al valor final de eficiencia de los materiales ya que será esto lo que determina sus propiedades ópticas.

También hemos hablado de que partiendo de ciertos materiales como son las bandas de absorción en vemos que el índice de refracción complejo toma un valor diferente según las características propias del medio.

Relacionado con el mundo de la óptica aplicada a la visión y la patología ocular, he mencionado que existe un problema bastante común llamado Ojo seco, el cual puede basar su etiología en la alteración de la incidencia del rayo luminoso en las diferentes capas de la lágrima pudiendo verse alterada una de ellas (como vimos, se trata de una capa estratificada). Con la parte imaginaria llegamos a la conclusión de que existe cierta pérdida o ganancia de la luz por el esparcimiento del rayo luminoso a lo largo de la onda. Otra aplicación para esta misma patología la veíamos en el estudio de una sola capa de la película lagrimal (Capa lipídica). A través de los colores interferenciales conseguimos medir el grosor de dicha capa y comparar los valores del grosor de la capa en un ojo sano, y en un ojo patológico, encontrando así cierta relación. Es decir, el ojo patológico tendrá valores inferiores a los del ojo sano, siendo esta capa menor.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Colin Maya M, Valencia Castro G, Acevedo Barrera A, Huerta Carranza O, Robles Gutiérrez I, Ramos Montes O et al. Estudio del índice de refracción complejo de la película lagrimal y su utilidad en el diagnóstico y tratamiento de alteraciones de la superficie ocular. México; 2018.
- [2] Cromer A. Física para las ciencias de la vida. 2ª Ed. Barcelona: Editorial Reverté SA; 1996.
- [3] Gómez Tejedor, JA. Ley de Snell. 2017 [en línea]. [Consultado en Mayo 2020]. Disponible en: <http://labvirtual.webs.upv.es/LeydeSnell.html>
- [4] Halliday D, Resnick R, Walker J. Fundamentals of physics. 11th Ed. Cleveland. John Wiley & Sons, INC; 2018.
- [5] Hernández C, Domenech B, Vázquez C, Illueca C. Óptica Geométrica: Teoría y cuestiones. Edición revisada. Alicante: Compobell SL; 2008.
- [6] Hlawiczka P. Introducción a la electrónica cuántica. 1ª Ed. Barcelona: Editorial Reverté SA; 1977.
- [7] Huerta Mascotte E, Mata Chávez RI, Estudillo-Ayala JM, Sierra Hernández JM, Guryev I, Lizárraga Morales RA. Estudio de las características de una celda fotovoltaica para el uso eficiente de la energía solar. Acta Universitaria, 26 (NE-1), 30-34.
- [8] López García S, García Lozano I, Martínez Garchitorena J. Estimación del grosor de la capa lipídica lagrimal mediante colores interferenciales en distintos tipos de ojo seco. Archivo Sociedad Española de Oftalmología [online]. Madrid; 2003.
- [9] Navarro Cía M, Beruete M, Sorolla M, Campillo I. Lentes metálicas basadas en el fenómeno de transmisión extraordinaria para conseguir índices de refracción negativos. Donostia; 2018.
- [10] Rex A, Wolfson R. Fundamentos de Física. 1ª Ed. Madrid: Pearson Educación, SA; 2011.
- [11] Ruiz Palacios D, Pérez Ramírez Y, Montiel González L. Validación de estrategias metodológicas que faciliten el análisis y comprensión en la resolución de problemas, utilizando la ley de Snell. Estelí; 2018.
- [12] Santos Benito, J. Manual de Óptica Geométrica. 1ª Ed. Alicante: Club Universitario; 1999.
- [13] Universidad de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Propagación de la luz en un medio. Valencia; 2008.
- [14] Wilson J, Buffa A, Lou B. Física. 6ª Ed. México: Pearson Educación; 2007.
- [15] R. Cárdenas, J. E Alfonso, J. Torres. Método para determinar las constantes ópticas de películas delgadas que presentan bandas de absorción. Revista colombiana de Física, Vol.35, No,1. Bogotá. 2003